

実物大モデル実験室を用いたラミナー給排気システムに関する検討

2021年3月修了予定 環境システム学専攻 47-196650 飯塚啓太郎

指導教官：大島義人 教授

Keywords : 実物大モデル実験室 気流解析 PIV解析 ソックダクト ラミナーフロー

1. 緒言

化学系実験室では多種多様な化学物質が使用されており、実験者の安全や健康保護の観点から実験室内の空気環境には局所排気装置の面風速などにおいて規制・規則がある。一方実験室はヒュームフード(FH)や実験台、高温装置などの気流に影響を与える実験什器の配置の多様さ、実験者が各々の目的に合わせて実験を行うために作業のタイミング・内容が任意に変更されうるといふ非定常性や、複数実験者に同時に使用されるといふ共有性といった特徴を持つことや、条件次第では実験中の実験者が自身の使用しない化学物質に曝露するといふ報告があることから^[1]、化学物質によるリスクが懸念される。

実験室内の気流へ影響する主な要因としては、①窓・装置による気流発生(換気扇・扉・窓・FH等の局所排気装置・エアコン)②熱源による上昇・下降気流の発生(実験装置・エアコン・人の体温・天井、床や壁面)③人やモノの存在及び移動による気流のかく乱^{[2][3][4]}が挙げられ、これらが独立かつ非定常的に作用しているために、実験室の空気環境の安全性を担保するには、これらの外乱を考慮に入れた部屋全体の気流の設計が必要と考えられる。

そこで本研究では実験室全体でラミナーフロー(一様で低風速なダウンフロー)を成す給排気システムを導入し、その実現の可否並びに外乱による影響の範囲・程度を検討することで、実験者への化学物質曝露リスク低減のための知見獲得を狙う。このシステムは、下方に向かう一様な気流が化学物質の拡散・暴露を防止し、かつ低風速な気流のために実験作業への影響が低減されるため、実験室において理想的であると考えられる。気流設計された屋内の先例としてクリーンルームがあげられるが、一方向への気流形式を採用するクリーンルームでは平均気流速度は最低でも0.2 m/s以上であり^[5]コストや実験者への影響という点で負荷が大きく、一般的な実験室への導入という観点では本システムの方がより良いと考えられる。これまで行った1/10スケールモデルでの予備実験において、全面給排気条件でのラミナー性や給排気面積の変化による渦の発生などを確認してきたが、実物大実験室を対象にした研究はまだない。

本研究では実物大モデル実験室を対象に、ラミナーフローの成立条件並びにそのロバスト性についてPIV解析を用い、全面給排気下における給排気量ごとのラミナーフロー成立についての検討を行うとともに、(1)モノの存在による気流性状への影響の検討(2)人の歩行による乱れの範囲・持続時間に関する検討(3)FH稼働時の気流性状に関する検討について検討した結果を報告する。

2. 実験及び解析方法

2-1 測定対象

本研究で対象とした実物大モデル実験室(X:5.2 m, Y:4.3 m, Z:2.6 m)の俯瞰図を図1に示す。給気は天井近傍の二本のソックダクトから行われ、排気はパンチングされた床面とFH(稼働時のみ)から行われる。室温は20°Cとし、ソックダクトから給気される風も20°Cとなるよう設定した。

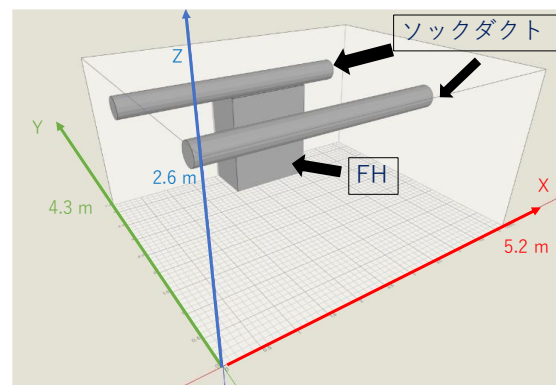


図1 対象実験室

2-2 PIV解析・風速測定

PIV(Particle Image Velocimetry: 粒子画像流速)解析とは、トレーサー粒子を混入させた気流にレーザーを照射し、ハイスピードカメラで撮影した映像から連続する粒子画像を取得・デジタル処理することで気流を速度ベ

クトルに変換する手法である。本研究では、レーザーには波長:532 nm 出力:3W (Sanctity laser)のものを、PIV解析ソフトウェアにFlowExpert2D (カトウ光研)を、トレーサー粒子としてプロピレングリコールが主成分のスモーク (粒径約 10 μm)を用いた。粒子は十分に小さく流れへの追随性は確保されている^[6]。また風速の測定には風速計 (KANOMAX 製 model6501)を用いた。

3. 結果と考察

3-1 全面給排気下における給排気量ごとのラミナーフロー成立についての検討

基本的に座した際の呼吸域 (床面からの高さ 0.7m~1.2m)におけるラミナー性を議論する。

モデル実験室に何も無い条件において、給排気量を変更しながら呼吸域の気流性状並びに速度についてPIV解析を行った。給排気量 600、1100、2200 m^3/h について換気回数換算表を表1に載せる。

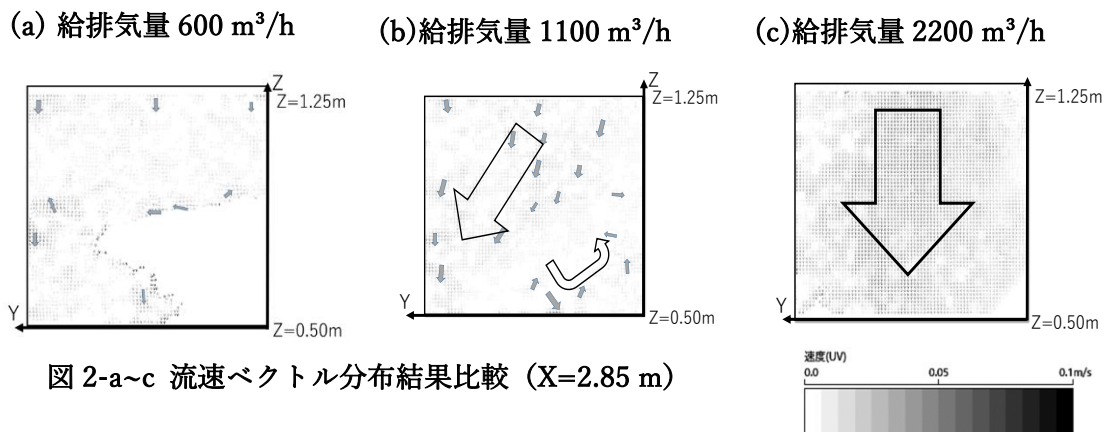
表 1 給排気量と換気回数の換算表

給排気量 (m^3/h)	600	1100	2200
換気回数 (回/h)	10.4	19.1	38.1

図 2-a~c にそれぞれ、給排気量 600、1100、2200 m^3/h 条件下の $X=2.85\text{m}$ における YZ 断面の流速ベクトル分布を示す。給排気量 600 m^3/h 条件 (図 2-a) では、特に定まった方向性を持ったベクトルは観測されず、追試での再現性もなかった。部屋全体に影響を及ぼすほどの給排気量ではなかったと考えられる。給排気量 1100 m^3/h 条件下では、大まかに上から下へのダウンフローが見られたものの、渦を巻く場所も観測された。他の断面での流速ベクトル分布調査から、モデル実験室壁面と室温との温度差により下降気流が生じ、それが床面で跳ね返っていることが確認されており、それによりラミナー性が阻害されていると考えられる。給排気量 2200 m^3/h の時、YZ 断面の流速ベクトル分布を図 2-c に示す。上から下へ 0.01~0.04m/s 程度のダウンフローが形成されていることが見て取れる。他の断面でも同様に上から下へのダウンフローが観測され、この条件下でラミナーフローが成立していることが確認された。

3-2 ラミナーフローに対する外乱の影響に関する検討

3-2-1 モノの存在による気流性状への影響の検討



モデル実験室中央に天板の大きさ 1.50 m \times 0.75 m、高さ 0.70 m で下部に空間のある机を設置し、給排気量 2200 m^3/h ・全面給排気条件で PIV 解析を行い気流性状の変化を調べた。机が置かれた部分についても床面からパンチングにより排気されている。図 3、4 に、机上部及び下部における $Y=2.00\text{m}$ での XZ 断面の流速ベクトル分布を示す。なお、机の横の気流は前条件下と比べ、向き、速さともに特筆すべき変化は見られず、上から下方向へのダウンフローが見られた。机上部では、天井から机天板上部 30cm あたりまではダウンフローが観測され、そこから天板に沿うように分離する気流が見られた。YZ 断面でも同様な

気流が見られた。机下部では、天板近くで渦を巻くような気流が見られ、床面近傍 10cm 程度の範囲で床へ吸い込む気流が見られた。

これらの結果から、この条件下においては机天板に化学物質を置く限りでは実験者への化学物質曝露リスクは少ないこと、また机下部のスペースに廃液タンクなどを置いた場合、普段の呼吸域にまでは影響しないもののそのスペース付近に化学物質が残存しやすい可能性が示唆された。

3-2-2 人の歩行による乱れの範囲・持続時間に関する検討

モデル実験室の地点 $(X, Y) = (1.00 \text{ m}, 2.50 \text{ m})$ から $(5.00 \text{ m}, 2.50 \text{ m})$ まで、身長 1.7m 程度の人が 1.0 m/s 程度の速さで歩き、それによる気流への影響を観察した。給排気量 $2200 \text{ m}^3/\text{h}$ 、全面給排気条件での $X = 2.80 \text{ m}$ 断面の PIV 結果を図 5-a~d に示す。 $t = 0 \text{ s}$ のとき (図 5-a) 3-1 の時と同様な気流が観測された。 $t = 1.5 \text{ s}$ のとき (図 5-b)、歩行者はレーザー断面を横切る直前であり、移動により空気が押された結果 Y 軸負の向きへ、 $0.05 \sim 0.10 \text{ m/s}$ 程度の気流が観測され。また、この影響が及んだ Y 軸方向への範囲は少なくとも 0.70 m 以上であることが観測された。 $t = 2.5 \text{ s}$ のとき (図 5-c)、歩行者はレーザー断面を通過し終えており、今度は歩行者が通過した空間に空気が吸い寄せられる気流が見取れ、特に腕が通過した付近では 0.10 m/s を超えるような気流が観測された。それから乱れた気流がしばらく観測された後、 $t = 12 \text{ s}$ のとき (図 5-d)、おおむね元通りの気流となった。これらの結果から、人の歩行によりラミナーフローは 0.7 m を超える範囲で大きく乱れることやその影響は 10 s 程度で収まることが示唆された。さらに歩行者から遠い位置や、移動の向きに平行な断面の影響などさらなる検討が必要である。

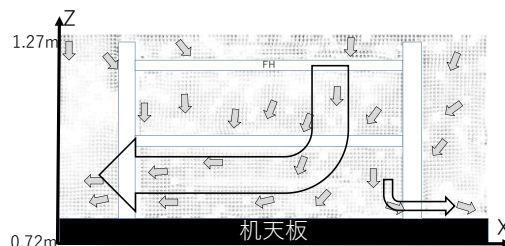


図 3 机上部の流速ベクトル分布 ($Y = 2.00 \text{ m}$)

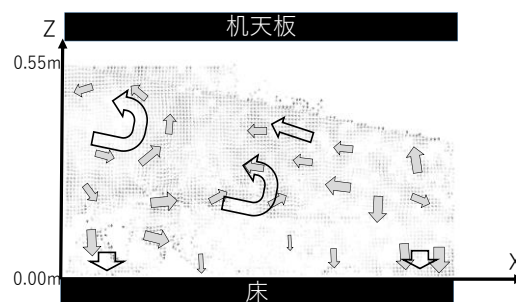


図 4 机下部の流速ベクトル分布 ($Y = 2.00 \text{ m}$)

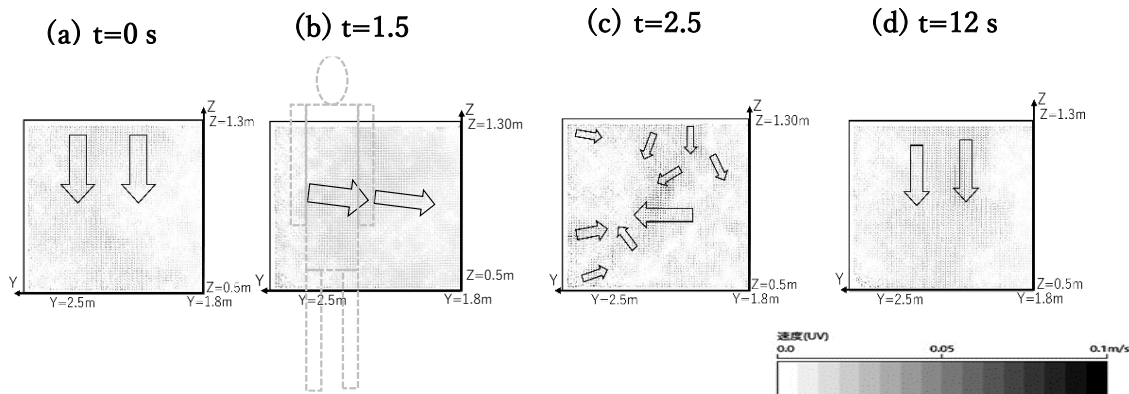


図 5-a~d 人の移動による流速ベクトル分布の計時変化 ($X = 2.80 \text{ m}$)

3-2-3 FH稼働時の気流性状に関する検討

モデル実験室のFH（開放面の底の高さは0.47 m）を稼働させ、FH排気面に垂直となるYZ断面（X=2.80 m）で、表2の実験を行った。なお、このFHは(b)の条件での使用が想定されている。

結果を図6-a~cに示す。(a)の条件では、FH近くでダウンフローの速

さが増加しているものの高さ0.5 m以上の範囲では横方向成分を持つ気流は見られなかった。(b)の条件ではFH開放面付近ではFHに吸い寄せられているものの、おおむね上から下向きへのダウンフローが保たれていた。(c)の条件ではFH開放面上部での吸引の結果高さ0.5~1.0 m付近で上向きの気流が生じている。

これらの結果から、開口部の面積が小さい(a)(b)の条件においては意図しない曝露リスクは小さいが、全面開放のような開口部面積が大きい(c)のような条件においては、横向きや上向きの気流が生じるため、例えば床に置いた廃液タンクから発生する化学物質への曝露リスクが示唆されることが分かった。

表2 実験条件

	(a)	(b)	(c)
ソックダクト給気量(m ³ /h)	2200	2200	2200
床面排気量(m ³ /h)	1048	1048	1048
FH排気量(m ³ /h)	1152	1152	1152
FH開放長さ(m)	0.07	0.4	0.67

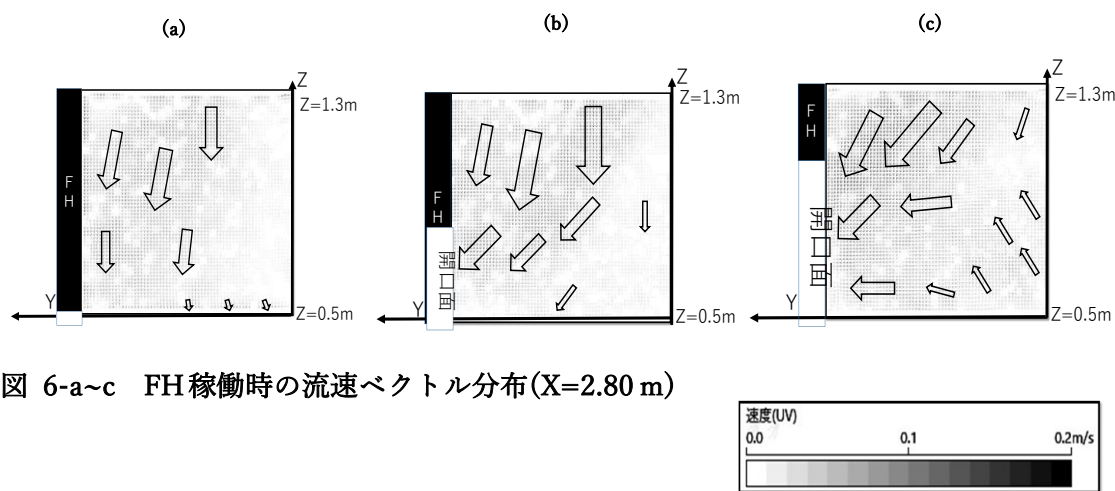


図 6-a~c FH稼働時の流速ベクトル分布(X=2.80 m)

4. まとめと今後の展望

実験室における非意図的曝露の低減を目的とし、ラミナーフロー給排気システムの成立条件並びにそのロバスト性について検討した。結果から以下のことが明らかになった。(1)給排気量 2200 m³/h の条件では一様なラミナーフローが観測されたこと(2)モノの存在によりラミナーフロー給排気システム内でも渦が生じること(3)人の歩行によるラミナーフローへの影響は少なくとも 0.7 m 以上に及び、10s 程度で収まること。(4)FH 開放面積によっては、非意図的曝露リスクの高い気流が生じること。

本研究では実物大実験室モデルを使用したため、無次元数の都合上縮小モデルでは厳密な再現が難しい Re 一致条件下でのモノの移動の影響について実際の実験室環境に近い結果を得ることができたと考えられる。今後の展望として、同じく縮小モデルでは再現が難しい Re 一致条件下での温度差による影響について有力な知見獲得が期待される。

参考文献：[1] 鍋島優輝,東京大学修士論文(2015). [2] 山口里奈,東京大学修士論文(2019) .[3] 松平晏明ら,日本機械学会論文集,70 巻 698 号(2004). [4] アプリティブ アプライティら,空気調和・衛生工学会,141-1448(2019). [5] 経済産業省,JIS B 9919,クリーンルームの設計及びスタートアップ(2004).[6]流れの可視化学会編,新版流れの可視化ハンドブック(朝倉書店),158-164(1986).